

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ОБЩЕГО КОЛИЧЕСТВА САЖИ ГЕНЕРИРУЕМОЙ ПРИ СЖИГАНИИ ПОПУТНОГО ГАЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ВОЗНИКАЮЩЕЙ ДЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

И.Х. Асадов

**Национальное аэрокосмическое агентство
г. Баку, Азербайджанская Республика**

Опасность сажи для окружающей среды и для здоровья человека общеизвестна. Будучи мелкодисперсной составляющей атмосферного аэрозоля сажа поглощает солнечные лучи и способствует нагреву атмосферы, что в свою очередь является важным фактором климатических изменений на Земле. С другой стороны частицы сажи легко проникают в легкие человека и серьезно нарушают функционирование всей дыхательной системы. Все это диктует необходимость проведения точного учета всего объема сажи, генерируемого факелами нефтегазопроизводства. Работа посвящена предлагаемому методу адаптивного измерения общего количества сажи генерируемой при сжигании попутного газа. Предложен адаптивный режим работы фотометра осуществляющего измерение коэффициента эмиссии сажи при сжигании попутного газа в факелах. Определено, что из-за зависимости высоты факела от скорости ветра, а также ограниченности поля обзора фотометра следует обеспечить адаптивный режим измерений, когда при увеличении скорости ветра, скорость поступления газа в трубу следует увеличить и наоборот.

В таком режиме фотометрических измерений удастся достичь минимальной величины средней высоты факела, что исключает возможные информационные потери и недостоверный результат измерения в случае установления режима адаптации на максимальный результат, который в обычном режиме измерений не обеспечивается из-за ограниченности поля зрения фотометра.

Ключевые слова: фотометр, газовый факел, сажа, адаптивные измерения, эмиссия.

THE SYSTEM FOR MEASURING OF TOTAL AMOUNT OF BLACK CARBON GENERATED UPON FLARING OF ASSOCIATED GAS FOR EVALUATION OF ECOLOGICAL DANGER OCCURRED FOR ENVIRONMENT

Asadov I.H.

**National Aerospace Agency
Baku, Azerbaijan Republic**

Danger of black carbon for environment and the human being health is well-known. The black carbon being a fine disperse component of atmospheric aerosol absorbs the solar beams and provides for heating the atmosphere, which in its turn is main factor of climatic changes in the world. From another side the black carbon particles easily entering into humans leaves brakes its normal functioning. All above mentioned urgently demands carrying out the accurate accounting of all volume of black carbon generated in gas flaring at the oil and gas production industry. The paper is devoted to suggested method of adaptive measurements of total amount of black carbon generated upon gas flaring. The adaptive regime of functioning of photometer carrying out measuring of black carbon emission factor in gas flaring is suggested. It

is determined that due to dependence of height of flared gas on wind speed and also due to limitation of view angle of photometer the adaptive regime of measurements should be installed that is when the wind speed increases the speed of gas provision into stack should be increased and vice versa. In such a regime of photometric measurements the minimum value of flared gas height could be reached which excludes the information losses and non authentic results of measurements which may occur due to limitation of view angle of photometer.

Key words: black carbon, adaptive regime, gas flaring, photometer, wind speed.

1. Введение

Как отмечается в работе [1], только в 2012 году общий мировой объем сожженного попутного газа, согласно спутниковым оценкам составил 143 миллиардов кубических метров, что составляет около 3,5% всего объема добываемого газа. Экономические потери, вызванные сжиганием попутного газа только в Нигерии составили 5 миллиардов долларов США. При сжигании попутного газа выделяются такие загрязнители атмосферы как CO_2 , CO , CH_4 , NO_x , N_2O , H_2S , аэрозоли. Из них CH_4 и N_2O являются парниковыми газами, потенциал нагрева которых выше, чем у CO_2 . Значительную долю в глобальном потеплении имеет сажа, потенциал нагрева которой чуть меньше чем у CO_2 . При этом, сажа имеет двойной механизм нагрева атмосферы: прямой, когда сажа поглощает солнечные лучи и косвенный, когда сажа оседая на поверхность льда и снега уменьшает альбедо поверхности земли. Однако, опасность сажи для населения планеты этим не исчерпывается. Будучи наиболее мелкоразмерными аэрозольными составляющими, частицы сажи легко проникают в дыхательно-респираторный тракт человека, вызывая там злокачественные новообразования. Такая масштабная опасность сажи для жизнедеятельности человека диктует необходимость создание новых, более эффективных методов и средств учета генерируемого в нефтепроизводстве сажи.

Известны [2] результаты измерений коэффициента эмиссии сажи, проводимых различной оптоэлектронной аппаратурой в различных регионах. Так, например, используя аппаратуру LOSA (Line – OF – Sight Attenuation) измерения проводились в Узбекистане [3] и в Мексике [4]. Результаты измерений составили соответственно 2 ± 0.66 гр/с и 0.062 ± 0.02 гр/с.

Следует отметить, что известны результаты и лабораторных методов определения коэффициента эмиссии сажи при сжигании газа. Так, согласно [5], коэффициент эффективности эмиссии сажи (EF) может быть вычислен по формуле

$$EF = 0.0578 \cdot HV - 2.09 \quad (1)$$

где HV – объемно-взвешенное количество теплового нагрева при сжигании попутного газа.

Вместе с тем, региональная изменчивость реализации технологических процессов приводит к значительному (до 21%) различию результатов полученных по формуле (1) [5].

Также следует отметить наличие орбитального метода оценки коэффициента эмиссии сажи при сжигании углеводородного газа [6]. Эта методика предусматривает проведение оценки коэффициента эмиссии сажи в два этапа:

1. Определение объема сжигаемого попутного газа с космоса, путем оценки светового потока исходящего с факелов ночью;
2. Определение коэффициента эмиссии с учетом специфики исследуемого региона.

Однако погрешность таких оценок достигает 14–15% [1], что указывает на актуальность разработки новых методов и средств для более точной оценки генерируемой сажи при сжигании попутного газа.

В настоящей статье предлагается метод построения адаптивной оптоэлектронной системы измерения коэффициента эмиссии сажи, управляемой в зависимости от скорости ветра в зоне сжигания попутного газа.

2. Материалы и методы

В качестве базовой наземной аппаратуры для реализации предлагаемого метода измерения рассмотрим оптоэлектронную систему “Sky – LOSA”, подробно охарактеризованную в работах [8, 9, 10]. Указанная аппаратура проводит измерения оптической радиации на узком спектральном диапазоне на искусственно формируемой контрольной поверхности сечения факела. На основе теории Релея – Дебая – Ганса получена формула для вычисления интегрированного по линии обзора объемной фракции сажи вдоль контрольной поверхности с учетом измеряемой величины скорости передвижения потока сажи. Массовый коэффициент (m) эмиссии в этом методе вычисляется по формуле

$$m = \overline{MEC}^{-1} \cdot \int \overline{V} [(-\ln \tau^*) dy] \quad (2)$$

где \overline{V} – скорость объемно-взвешенной фракции частиц сажи в направлении нормали к контрольной поверхности вдоль линии обзора (м/с); τ^* – пропускание вдоль линии обзора при отсутствии внешних эффектов рассеяния; \overline{MEC} – средняя величина поперечного сечения экстинкции массы вдоль линии обзора (м²/гр).

Подробно не останавливаясь на методе Sky – LOSA отметим один из его основных недостатков – отсутствие учета влияния скорости ветра на результат проводимых измерений. Подробно рассмотрим влияние скорости ветра на высоту подъема факела при сжигании попутного газа. Высота факела определяется его подъемностью (buoyancy), определяемой отношением плотности нагретого воздуха к плотности холодного воздуха окружающей среды. При высокой степени подъемности факела высота факела может увеличиться в несколько раз [11]. Следовательно, при проведении оптоэлектронных измерений состояния факела следует учесть скорость ветра и вводить соответствующую эмпирическую коррекцию в результаты измерений. Другой, более эффективный путь учета влияния ветра состоит в организации оптимального адаптивного режима измерений когда высота факела адаптивно стабилизируется в режиме оптимального учета влияния скорости ветра. Приведем теоретическое обоснование предлагаемого метода адаптивной стабилизации высоты факела попутного газа.

Согласно [12, 13] высота факела сжигания попутного газа может быть вычислена по формуле

$$\Delta H = 2.6 \left(\frac{F_b}{VS} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

где F_b – показатель эффекта подъемности (м⁴/с³); V – скорость ветра (м/с); S – показатель стабильности (с⁻²) [2].

F_b определяется по формуле (4)

$$F_b = g \cdot \frac{\Delta T}{T_s} w \cdot r \quad (4)$$

S определяется по формуле (5)

$$S = \frac{g}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) + \Gamma \quad (5)$$

В формуле (4) и (5) указаны: T – абсолютная температура окружающего воздуха; T_S – абсолютная температура газа в трубе; W – вертикальная скорость газа при выходе из трубы; r – радиус трубы; ΔT – разница между двумя указанными температурами; g – гравитационная постоянная; Γ – постоянная адиабатической ошибки, опустошения.

Для условий стабильной атмосферы $S=const$. Также приняв $T_S=const$, формулу (3), с учетом (4) и (5) перепишем в виде

$$\Delta H = A \cdot \left(\frac{W}{V} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

где

$$A = \frac{2.6 \cdot g \cdot \Delta T \cdot r}{T_S \cdot S} \quad (7)$$

Так как скорость ветра V объективно является неуправляемой величиной, а скорость газа W может быть изменена путем регулировки давления подачи газа, то разумно ввести режим адаптации W к показателю V . Таким образом, вводим функцию адаптивного управления процессом сжигания в виде

$$W = f(V) \quad (8)$$

С учетом (8) выражение (6) запишем как

$$\Delta H = A \cdot \left(\frac{f(V)}{V} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

Рассмотрим случай, когда скорость ветра изменяется в интервале ($V_{min} \div V_{max}$). Наложим на указанном интервале ограничительное условие на выбор функции $f(V)$ в виде

$$F = \int_{u_{min}}^{u_{max}} f(V) dV = C; C = const \quad (10)$$

Целевой функционал оптимизации с учетом (9) сформируем в виде

$$F_1 = \int_{u_{min}}^{u_{max}} A \cdot \left(\frac{f(V)}{V} \right)^{\frac{1}{3}} dV \quad (11)$$

С учетом (10) и (11) сформируем функционал безусловной вариационной оптимизации

$$F_2 = \int_{u_{min}}^{u_{max}} A \cdot \left(\frac{f(V)}{V} \right)^{\frac{1}{3}} dV - \lambda \left[\int_{u_{min}}^{u_{max}} f(V) dV - C \right] \quad (12)$$

где λ – множитель Лагранжа; $F_2 \rightarrow \text{extremum}$

Согласно [14], решение задачи (12) должно удовлетворять условию

$$\frac{\partial \left\{ \left(\frac{f(V)}{V} \right)^{\frac{1}{3}} - \lambda [f(V) - C] \right\}}{\partial f(V)} = 0 \quad (13)$$

Из (13) получим

$$\frac{2}{3} \cdot \frac{A}{V} \cdot f(V)^{-\frac{2}{3}} + \lambda = 0 \quad (14)$$

Из (14) получим

$$f(u) = \frac{1}{3\sqrt{\lambda^2}} \sqrt{\left(\frac{2A}{3V} \right)^2} \quad (15)$$

Из (10) и (15)

$$\lambda = \sqrt{\frac{\left(\frac{2A}{3} \right)^2 \cdot V_m^{\frac{3}{2}}}{C^2}} \quad (16)$$

С учетом (14) и (16) получаем

$$f(u) = \frac{C}{\sqrt{V_m}} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{1}{V} \right)^2} \quad (17)$$

Проверка знака второй производной интегранта в (12) по $f(V)$ показывает, что при решении (17) F_2 достигает максимума.

Таким образом, при обратной зависимости W и V , согласно (17) рост пламя достигает максимума. Следовательно, эвристически можно предположить, что для минимизации F_2 – интервального прироста высоты факела из-за изменения V в пределах ($V_{min} \div V_{max}$) следует обеспечить прямую зависимость между W и V , т.е. чем сильнее ветер, тем больше должна быть скорость газа на выходе трубы факела.

3. Вопросы реализации

Рассмотрим вариант реализации метода измерения эффективности эмиссии сажи с факела попутного газа. Напомним, что суть предлагаемого метода заключается в организации адаптивного управления высотой факела в зависимости от скорости ветра для достижения минимального суммарного изменения. Вариант возможной реализации метода показан на рис. 1.

Устройство работает следующим образом: с помощью измерителя 5 осуществляет измерение скорости ветра в зоне сжигания попутного газа. Результат измерения подается на вычислитель 3, который обеспечивает формирование управляющего сигнала для блока управления скоростью движения газа в трубе. Одновременно вырабатывается сигнал

управления для блока 1 фотометрического измерения имеющего максимальный угол обзора $\Delta\phi$. Так как адаптивный режим управления величиной ΔH обеспечивает отсутствие увеличения величины ΔH и обеспечивает только ее уменьшение в оптимальном режиме, то исключается погрешность измерения из-за выхода факела из предельно возможного поля зрения фотометра.

Приблизительный расчет увеличения информативности в адаптивном режиме работы осуществим с учетом ромбовидной аппроксимации измеряемой площади сечения факела (рис. 2).

Приняв

$$B''B' = B'B = DD' = D'D'' = \frac{BA}{2} = \frac{AD}{2}$$

а также учитывая обеспечение пространственного разрешения фотометра на фигурах $AB'C'D'$ и $ABCD$, коэффициент выигрыша K в информативности определим как

$$K = \frac{T_1 S(AB'C'D') + T_2 S(ABCD)}{T_1 S(AB'C'D')} = 1 + \frac{T_2}{T_1} \cdot \frac{S(ABCD)}{S(AB'C'D')}$$

где T_2 – время выдачи информации в режиме минимизации; T_1 – время выдачи информации в режиме максимизации.

Даже в случае $T_2 = T_1$, K всегда больше единицы, т.е. выигрыш имеется всегда.

Отметим, что информация с площади $AB''C''D''$ здесь не учтена, т.к. такая информация из-за ограниченности поля обзора оказалась бы недостоверной.

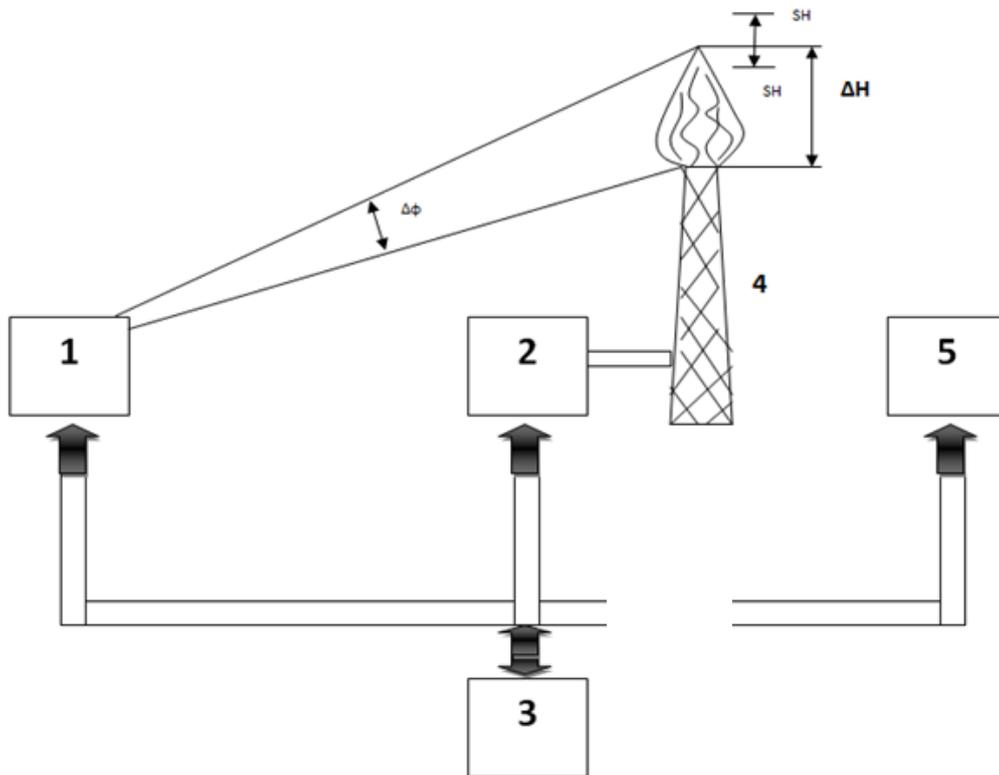


Рис. 1. Блок – схема адаптивной системы измерения эффективности генерации сажи

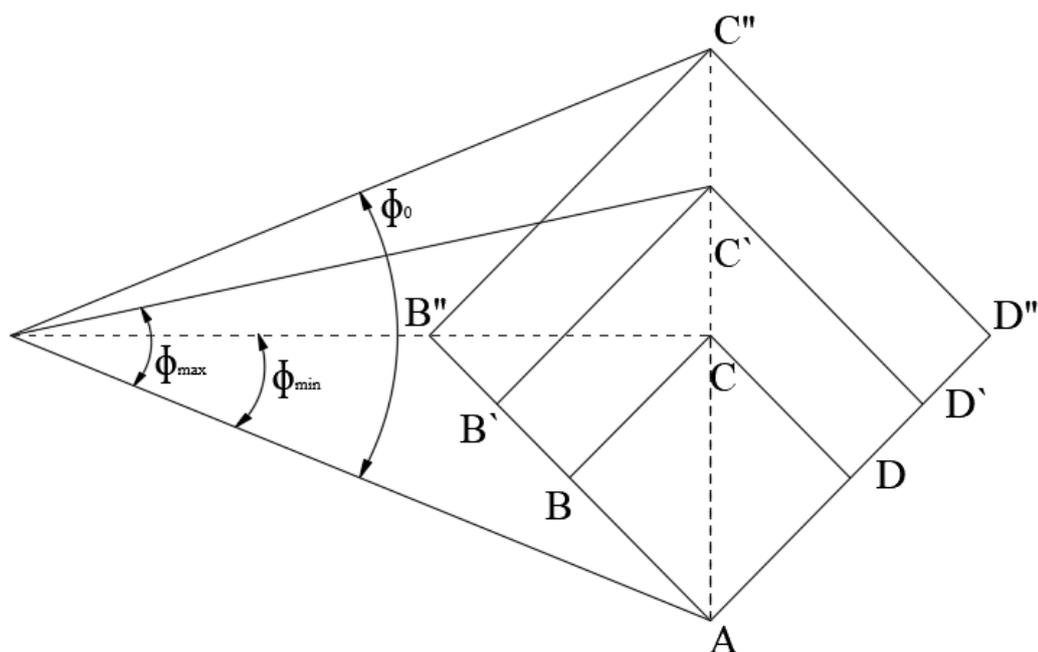


Рис. 2. Пояснительный рисунок для оценки повышения информативности при проведении адаптивных фотометрических измерений.

Принятые обозначения: φ_{\max} – максимально допустимый угол обзора; φ_{\min} – минимальный угол обзора в режиме адаптивного измерения; φ_0 – отсутствующий угол обзора

4. Заключение

Рассмотрен и решен вопрос создания адаптивного режима работы фотометра осуществляющего измерение коэффициента эмиссии сажи при сжигании попутного газа в факелах. Показано, что из-за зависимости высоты факела от скорости ветра, а также ограниченности поля обзора фотометра целесообразно обеспечить адаптивный режим измерений, когда при увеличении скорости ветра, скорость поступления газа в трубу следует увеличить и наоборот.

При таком адаптивном режиме измерений удастся достичь определенной минимальной величины средней высоты факела, что исключает возможные информационные потери и недостоверный результат измерения в случае установления режима адаптации на максимальный результат, который не обеспечивается из-за ограниченности поля зрения фотометра.

Литература

1. Huang K., Joshua S.F. Data descriptor: A global gas flaring black carbon emission rate dataset from 1994 to 2012// Scientific data. 3:160104. DOI:10.1038/sdata. - 2016.104.
2. Schwarz J.P. Black carbon emission from the bakken oil gas development region// Environ. Sci. Tech. - 2015. Let 2. Pp. 281-285.
3. Johnson M.R., Devillers R.W., Thomson K.A. Quantitative field measurement of soot emission from a large gas flare using Sky – LOSA// Environ. Sci. Technol. - 2011. Vol. 45. Pp. 345-350.
4. Johnson M.R., Devillers R.W., Thomson K.A. Generalized Sky – LOSA method to quantify soot/black carbon emission rates in atmospheric plumes of gas flares// Aerosol Sci. Tech. - 2013. Vol. 47. Pp. 1017-1029.

5. McEwen J.D. N., Johnson M.R. Black carbon particulate matter emission factors for buoyancy – driven associated gas flares// J. Air Waste Manage. - 2012. Vol. 62. Pp. 307-321.
6. Conrad B.M., Johnson R.M. Field measurements of black carbon yields from from gas flaring// Environmental Science & Technology.
7. Schwarz J.P., Holloway J.S., Katich J. M., McKeen S., Kort E.A., Smith M.L., Ryerson T.B., Sweeney C., Peischl J. Black carbon emission from the bakken oil and gas developments region// Environ. Sci. Technol. Lett. - 2015. Vol. 2(10). Pp. 281-285.
8. Johnson M.R., Devillers R.W., Thomson K.A. Quantitative field measurement of soot emission from a large gas flare using Sky – LOSA// Environ. Sci. Technol. - 2011. Vol. 45. Pp. 345-350.
9. Johnson M.R., Devillers R.W., Yang C., Thomson K.A. Sky- Scattered solar radiation based plume transmissivity measurements to quantify soot emission from flares// Environ. Sci. Technol. - 2010. Vol. 44(21). Pp. 8196-8202.
10. Johnson M.R., Devillers R.W., Thomson K.A. Generalized Sky – LOSA method to quantify soot/black carbon emission rates in atmospheric plumes of gas flares// Aerosol Sci. Tech. - 2013. Vol. 47. Pp. 1017-1029.
11. Brocchi V., Krysztofiak G., Deroubaix A., Stratmann G., Sauer D. Local air pollution from oil rig emissions observed during the airborne DACCIWA campaign// Atmospheric Chemistry and Physics, European Geosciences Union. - 2019. Vol. 19(17). Pp. 11401-11411. insu – 02284833. DOI:10.5194/acp-19-11401-2019.
12. Briggs G.A. Plume rise model compared with observations// Journal of the Air Pollution Control Association. - 1965. Vol. 15. Pp. 433-438. <https://doi.org/10.1080/00022470.2965.10468404> .
13. Briggs G.A. Plume rise and buoyancy effects, atmospheric sciences and power production, in DOE/TIC-27601(DE84005177), edited by Randerson D., TN, Technical Information Center, U.S. Depth. Of Energy, Oak Ridge, USA. - 1984. Pp. 327-366.

Сведения об авторе

Асадов Ильгар Хикмет оглу, аспирант Национального аэрокосмического агентства, руководитель группы Бакинского подразделения Компании Камерон. тел. +99450 3247240. г.Баку, Азербайджанская Республика

УДК: 621.039

DOI: 10.36535/0869-4176-2020-04-5

О ПЛАНИРОВАНИИ МАРШРУТОВ ПЕРЕДВИЖНЫХ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ЛАБОРАТОРИЙ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ РАДИАЦИОННОГО ХАРАКТЕРА

**Кандидат техн. наук *Е.В. Попов*, кандидат физ.-мат. наук *В.А. Пантелеев*,
доктор техн. наук *М.Д. Сегаль*, *С.Л. Гаврилов*, *А.Е. Пименов*
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН**

Приводится описание применения передвижных радиометрических лабораторий (ПРЛ) для проведения радиационной разведки при возникновении аварийных ситуаций на ядерно и радиационно опасных объектах. Кратко описываются типы ПРЛ и их применение на ранней и промежуточной стадиях радиационной аварии. Более подробно